第27卷 第4期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.4
2015年7月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY Jul. 2015

专题介绍

铁基牺牲阳极的研究进展

田 璇 丁冬雁

上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240

摘要：针对铁基牺牲阳极在工业生产中的应用，分析了铁基牺牲阳极对电位较正金属 (如Cu、不锈钢和钛合金) 阴极保护的可行性。综述了几种铁基材料作为牺牲阳极的性能，以及作为牺牲阳极在保护Cu、不锈钢和钛合金中的实际应用。提出了铁基牺牲阳极未来的研究重点和发展方向。

关键词：阴极保护 铁基牺牲阳极 低驱动电位

中图分类号：TG174 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-6495(2015)04-0382-05

1 前言

工业设备中的金属腐蚀会给工业生产带来巨大损失，防止金属腐蚀主要有3种途径：选用耐腐蚀材料、在金属表面镀耐腐蚀涂层以及采用阴极保护措施。阴极保护就是给被保护的金属表面提供一个电流，使金属表面发生阴极极化，电位降低到最小保护电位，使得腐蚀停止的方法。阴极保护由于操作方便，节约成本，广泛应用于地下管网、码头船舶、军用车辆、建筑材料、石油和化学工业，对金属部件防腐起着重要的作用[1-9]。阴极保护方法有外加电流法和牺牲阳极法。外加电流法就是将被保护金属与外加电源的负极相连，被保护金属得电子则不会被腐蚀。外加电源提供的电流较稳定，但实施和维护较繁琐。牺牲阳极法是将被保护金属和电位更负的金属连接，电位更负的金属发生腐蚀，产生腐蚀电流，该方法设备简单、成本低，但是驱动电流有限，常用于电阻率较小的海洋环境。

在生产过程中通常使用Mg，Al和Zn牺牲阳极用作钢铁的保护，这些牺牲阳极具有固定的元素比例和牺牲阳极牌号，对Mg，Al和Zn牺牲阳极的研究已经开展地很广泛。但是，对于一些耐腐蚀的金属，如铜合金、钛合金、不锈钢等，上述牺牲阳极有一个共同的缺点即工作电位太负。与耐腐蚀金属的电位差太大，容易导致这类牺牲阳极消耗过快，从而导致生产成本增加和资源浪费；电位差太大还有可能导致金属吸氢，引起氢脆，给生产带来更大损失。因此，电位较正的金属不能使用Mg，Al和Zn牺牲阳极，而应该使用工作电位较正的低驱动电位牺牲阳极。国外主要研究A1-Ga二元合金作为低驱动电位牺牲阳极材料[10-12]，国内对低驱动电位牺牲阳极的研究也主要集中在A1-Ga二元合金[13]，但到目前为止，还没有开发出性能优良的低驱动电位牺牲阳极材料。而Fe牺牲阳极与Mg，Al和Zn牺牲阳极相比，拥有合适的腐蚀电位，与电位较正的金属之间具有较低的驱动电位[11]，并且来源广泛、价格低廉，因此铁基牺牲阳极具有良好的应用前景。

2 铁基牺牲阳极概述

对金属施加阴极保护前，常通过测量稳态阴极极化曲线来确定阴极保护参数[14]，即阴极金属的最小保护电位和最小保护电流密度。工业中使用较多的电位较正的金属主要是铜合金、钛合金和不锈钢。铜合金的腐蚀电位约为−0.1~−0.2 V (SCE，下同)，钛合金的腐蚀电位约为+0.3 V[15]，不同类型不锈钢的腐蚀电位相差较大，常用的1Cr18Ni9Ti腐蚀电位约为−0.2 V[16]。而常见的纯Fe及碳钢材料的自然腐蚀电位约为−0.7 V[15,17]，对应铜合金、钛合金和不锈钢都具有400 mV以上的驱动电位，因此使用碳钢等铁基材料作为牺牲阳极保护铜合金、钛合金和不锈钢是可行的。

关于铁基牺牲阳极使用的最早报道是在1969年[18]，在铁基牺牲阳极的保护下，316不锈钢在海水中暴露649 d，不锈钢的局部腐蚀发生在有效的控制范围内。自上世纪80年代以来，在工业生产中已开始使用铁基牺牲阳极保护工业设备。有文献报道[19]，在海水中用碳钢作为牺牲阳极保护不锈钢，保护时长可达8 a以上。采用铁基牺牲阳极保护船舶铜冷却器，可延长阳极使用寿命，减小阳极更换次数[20]。有专利报道了一种适于保护铜合金海水管路

定稿日期：2014-09-05

基金项目：国家重大科学仪器设备开发专项项目(2012YQ15000105)资助

作者简介：田璇，男，1991年生，硕士生

通讯作者：丁冬雁，E-mail：dyding@sjtu.edu.cn，研究方向为金属材料、电子材料与技术及热传输材料

DOI：10.11903/1002.6495.2014.243

的长寿命铁基牺牲阳极 (添加元素为Mn，Cr及微量Al)，该发明能大幅度增加阳极重量，显著增加阳极使用寿命，可应用于难于进行维修保养的海水管路[21]。对于12Cr钢海底管线立管，采用铁基牺牲阳极也可以实现有效防护[22]。上海石化总厂采用Q235钢作为牺牲阳极保护铜热海水交换器也取得良好效果。钢铁研究总院青岛海洋腐蚀研究所采用铁基牺牲阳极保护不锈钢及铜合金。海水淡化的不锈钢设备，海水电厂的不锈钢泵都大量采用了铁基牺牲阳极来保护，并且已初步形成产品系列[23]。

3 铁基牺牲阳极的性能

一种优秀的牺牲阳极材料需要具有合适的自腐蚀电位和极化电位、具有较高的电流效率和均匀易溶解的腐蚀产物。评价铁基牺牲阳极也需要从上述几个方面开展。

罗兆红等[24]系统研究了几种铁基材料包括工业纯铁、16Mn钢、45钢和Mn13钢的牺牲阳极性能。实验结果表明：几种材料都有稳定的工作电位，约为−0.6 V，其中Mn13钢的开路电位和工作电位较负，说明Mn较负的自身电位降低了Fe基体电位。铁基材料中阴极相的增加降低了电流效率，但电流效率也基本维持在95%以上。而且没有像Zn和Mg牺牲阳极中的杂质元素一样增加阳极自身溶解，导致电流效率显著降低；或者出现表面形成氢氧化物薄膜，阻碍阳极进一步溶解的现象。可以认为铁基牺牲阳极中的杂质元素对牺牲阳极的性能影响不大，不必严格控制其含量。铁基牺牲阳极的腐蚀表面呈均匀溶解，腐蚀产物易清除，不存在像铝合金牺牲阳极那样因钝化造成腐蚀不均匀，使未溶部分脱落而造成电流效率降低。因此，不需要添加合金元素来活化牺牲阳极。

陈珊等[25]对比了俄罗斯产铁基牺牲阳极与几种典型的国产铁基牺牲阳极材料 (Q235B钢，20钢和45钢) 的电化学性能。实验结果表明，4种铁基牺牲阳极材料的开路电位相近，约为−660 mV，而铜合金在海水中的腐蚀电位约为−0.2 V，二者之间驱动电位适宜。四种材料工作电位变化范围相当，约为−560~−590 mV；同时，3种国产铁基牺牲阳极的实际电容量和电流效率分别达到了900 A·h/kg和94%，优于俄罗斯铁基牺牲阳极的870 A·h/kg和91%；另外，在溶解均匀程度方面，国产铁基牺牲阳极也要优于外购的铁基牺牲阳极。

孙仁兴等[26]在研究铁合金牺牲阳极在铜合金海水管路中的保护作用时，对铁合金牺牲阳极材料进行恒温30 ℃，实验周期11 a的海水浸泡实验。实验结果表明铁合金阳极的稳定开路电位为−672~−722 mV。而Cu和铜合金的最小保护电位为−430~−580 mV[27]，二者的电位差约为200 mV，驱动电位适宜。对铁合金牺牲阳极材料的极化曲线测试表明，在电流密度为0.1~10 mA/cm^{2}的范围内，铁阳极的极化电位为−650~−500 mV，仍然负于铜合金的最小保护电位。实验结束后，铁阳极表面覆盖着均匀的红棕色腐蚀产物，除去后可见表面为全面均匀腐蚀。

Wang等[28]在研究工业纯铁、20钢和35钢对铜合金的阴极保护作用时，参照GB/T 17848-1999对3种不同的铁基牺牲阳极材料进行了恒电流实验。工业纯铁、20钢、35钢的开路电位分别为−614、−631和−611 mV；在15 d的实验时间内，三者的工作电位稳定，变化范围很小，工作电位范围分别为：−604~−585，−594~−570和−585~−553 mV。实验结束后阳极表面为棕色腐蚀产物，内部为黑色腐蚀产物，腐蚀产物易清除，并且样品表面平整，无明显小孔点蚀形貌。3种合金的实际电容量高，电流效率能够达到95%。因此这3种材料都具有优良的牺牲阳极性能。

王顺等[29]通过恒电流实验测试了35钢在海水和淡水中的牺牲阳极性能，实验结果表明：35钢在海水和淡水中的开路电位为−671和−653 mV，相差不大，而工作电位分别为−592和−308 mV，相差约300 mV，工作电位随时间的变化都比较稳定。实验表明在海水和淡水中，35钢的电流效率均达到90%以上。实验结束时，试样表面覆盖着一层薄薄的黑色腐蚀产物，腐蚀产物易去除；清除后，阳极试样表面平整，无较大的蚀坑。王顺等[30]采用恒电流阶跃阳极极化法分别测试了工业纯铁和35钢在海水和淡水中的阳极极化曲线，极化开始时电流密度较小 (0~0.2 mA/cm^2) 的情况下，阳极极化程度最大。之后随电流增大，二者在海水中的工作电位基本稳定，与阴极金属之间具有足够的驱动电位，因此在海水中具有优秀的牺牲阳极性能；而在淡水中，当电流较大时工作电位正移严重，牺牲阳极与阴极金属之间驱动电位降低，将失去对阴极金属的保护作用。

4 铁基牺牲阳极的应用

4.1 保护铜合金

由于制造工艺成熟，品种规格齐全和价格适中，铜合金在海水管路和制冷机冷凝管中具有广泛的应用。尽管铜合金拥有良好的耐腐蚀性能，但由于多工作于易腐蚀环境，并且相连结构复杂，发生腐蚀在所难免。过去常用锌基牺牲阳极作为铜合金的阴极保护，但实际使用过程发现了很多问题。主要是锌

阳极与铜合金的电位相差过大 (约800 mV)[28]，牺牲阳极溶解过快，而舰艇在航行期间又不易经常更换部件，导致海水管路在安装锌阳极几个月后即长期处于无保护状态。黄佳典等[31]采用铁合金阳极和锌合金阳极分别在流动海水中保护紫铜管路，实验发现锌合金阳极的过负电位加快了牺牲阳极的消耗速度，缩短了其使用寿命，同时紫铜表面生成了斑点状蚀坑；而铁合金阳极的消耗速度慢，紫铜表面无腐蚀痕迹，保护效果良好。

中船重工725研究所开发出了一种铁基牺牲阳极材料，对铜合金海水管路施加阴极保护[26]，并分别评价了铁基阳极在静止和流动海水中保护紫铜的效果。在静止海水中，铁阳极的腐蚀电流密度在3 h内达到稳定，紫铜的保护电位达到-625 mV，小于铜合金的最小保护电位-430 mV，对紫铜的保护度可达92.6%。紫铜在2和4 m/s的流动海水中的自然腐蚀电位分别是-410和-430 mV，使用铁基阳极进行阴极保护后，2 m/s时为-606 mV，4 m/s为-592 mV，负移量分别为196和162 mV，达到了铜合金的阴极保护电位小于-430 mV的要求。

Wang等[28]采用极化曲线测试对比了工业纯铁、20钢、35钢保护铜合金与锌合金、铝合金保护铜合金的区别。锌合金和铝合金保护铜合金时，耦合电位与铜的最小保护电位之间的电位差达到了600 mV以上，锌合金、铝合金与铜合金的耦合电流密度分别达到0.080和0.091 mA/cm^2。而3种铁基牺牲阳极材料保护铜合金时，耦合电位与Cu的最小保护电位间的电位差约为200 mV，工业纯铁、20钢和35钢与铜合金的耦合电流密度分别为0.050，0.051和0.050 mA/cm^2。很明显铁基牺牲阳极在保护铜合金时的耦合电流密度要比锌合金和铝合金小，因为保护电流更小，所以铁基牺牲阳极的消耗更慢，牺牲阳极服务的寿命更长。

邢少华等[32]运用基于边界元算法的BEASY软件分析了铁阳极对紫铜 (TUP) 和铜镍合金 (B10) 管材保护的可行性，计算了铁阳极对两种铜合金的有效保护距离。根据管道内壁电位分布图，当电位负于-0.4 V时，可以认为铜合金处于保护状态。模拟结果显示在铁阳极安装位置的403 mm距离内，TUP管道处于有效保护范围，而对于B10管道这一数值是357 mm，并且管道中电位最低值为-0.55 V左右，这一数值高于Cu的析氢电位，保证了析氢反应不会发生。为了验证模拟结果的可靠性，实际测量了按照模拟管道的尺寸和结构设计的铜合金管道电位分布。实际测量结果与数值模拟结果相吻合，阳极分别在400和350 mm距离内对TUP和B10管道处于有效保护范围。王巍等[33]选用35钢作为牺牲阳极在海水中保护紫铜，使用6种不同的物理模型，用二维有限元法预测稳定状态下的电位分布情况，并将预测值与实验值进行了比较，实验证明采用35钢作为牺牲阳极保护紫铜具有可行性。

王曰义[34]研究了3种牺牲阳极材料，即三元锌合金 (ZAC)、四元铝合金 (AZI) 和Q235钢在流速为2.3 m/s、含砂3‰的流动海水中对紫铜腐蚀行为的影响，发现与三种牺牲阳极电连接的紫铜试样都没有明显的冲击腐蚀痕迹。Q235钢保护的紫铜表面形成了牢固、致密且均匀的褐色膜。ZAC和AZI保护下的紫铜表面除褐色膜外，还生成少量分布不均匀的白色钙质膜，除膜后放大25倍观察到微小腐蚀斑点。因此在紫铜海水管路的阴极保护中，使用铁基牺牲阳极比锌基和铝基牺牲阳极更合适。

王顺等[29]分别测量了紫铜在海水和淡水中的极化曲线。紫铜在海水和淡水中的自腐蚀电位分别为-223和-38 mV，而35钢在海水和淡水中的工作电位分别为-592和-308 mV，二者的电位差均达到300 mV以上。因此35钢与紫铜之间有足够的驱动电压，可以提供有效的阴极保护。在静止海水中，用35钢对紫铜进行阴极保护，在10 d内紫铜自腐蚀电位变化不大，为-223~-235 mV。而阴极电位随时间逐渐负移，变化范围为-575~-672 mV。阴极电位负移300 mV以上，负移量达到了文献[35,36]提出的阴极电位最小负移100~200 mV的标准。实验结束后发现，在35钢的保护下紫铜表面光亮，而无保护的紫铜表面生成棕色腐蚀产物膜，证明35钢对紫铜施加了有效的阴极保护。

铁基牺牲阳极除了对铜合金的阴极保护作用外，另外一个特殊优点是溶解的铁离子能够在铁合金表面生成富铁保护膜，阳极被一定程度地钝化，从而减小阴极保护电流，延长阳极使用寿命。黄佳典等[31]在利用铁合金保护铜及其合金海水管路的实验中发现，在2.3 m/s的流动海水中，铁合金阳极存在但不电连接时，紫铜的腐蚀率为0.18 mm/a，而紫铜在流动海水中的自然腐蚀速率为0.56 mm/a。显然仅仅因为溶解的铁离子的缓蚀作用，就让紫铜获得73%的保护度。

4.2 保护钛合金

Ti具有优异的耐腐蚀性能，即使在污染的或高速流动的海水中，Ti也几乎不受腐蚀[37]，因此钛合金在海水淡化、海水冷却过程获得广泛的应用，常用于制造海水中的换热器和冷凝器。但是在使用过程

中，钛合金经常需要与其他金属一起使用。Ti的稳定电位很正，约为+0.3 V (SCE)，与其他金属 (如Zn，Al，不锈钢和铜合金等) 偶接时，会引起电偶腐蚀[38]，其他金属作为阳极被腐蚀消耗，而在阴极钛合金表面电位负于钛合金吸氢临界电位的情况下，电解质中聚集在阴极钛合金附近的H^+，在获得电子后一部分变成氢原子进入其中，在Ti的表面形成一层脆性氢化物层[39]，另一部分复合成氢分子，变成气泡溢出。因此钛合金在与其他金属一起使用时，可能受到吸氢造成的氢脆破坏的影响，导致设备断裂失效[40]。

在海水冷凝器、凝汽器的制造中，由于钛合金的成本较高，在实际使用时通常在关键管路处使用钛合金，而管板或封头处使用铜合金。但是这样的电偶接触会加速铜合金的腐蚀，需要进行阴极保护。金属表面的阴极反应一般是氧的去极化作用，生成的OH^-与Ca^{2+}，Mg^{2+}结合，在金属表面形成钙质沉积层，降低阴极保护电流密度，提高阴极保护经济性[41]；而如果保护电位过负，即过度阴极极化，则可能使金属表面电位负移到析氢电位，而发生析氢反应，会导致钛合金管口吸氢而脆化。对于海水冷却器、凝汽器钛管口吸氢脆断的事例，国内外已有多次报道[42-44]。

根据GB/T 16166-1996中规定钛的保护电位为大于−0.75 V，而铜合金的最小保护电位约为−0.43 V，在实际使用时既要考虑到保护铜合金，又要防止钛合金吸氢，因此阴极电位以−0.50~−0.70 V为宜。由于自身电位过负，常用的Al，Mg和Zn基牺牲阳极不能满足电位的要求；需要采用工作电位适中的铁基牺牲阳极。而常见的铸铁或铸钢牺牲阳极的腐蚀电位约为−0.7 V，与Ti吸氢临界电位接近，不太适用，并且溶解形成的铁锈会促进钛管吸氢[45]。

余存烨等[46]对上海石化使用10余年的两台复水器钛合金管口进行探伤，钛合金管口发现了严重的吸氢现象，吸氢量达到1000~1500 mg/L，试样中分布着粗大的针状氢化物，这是因为这两台凝汽器使用锌牺牲阳极保护，导致保护电位远远负于钛的临界吸氢电位。另10余台采用铸钢牺牲阳极保护的钛海水冷却器，也经常发生管口泄漏。余存烨[47]在研究钛铜共用的海水冷却器的牺牲阳极保护时，比较了Q235钢、进口铸钢、工业纯铁、Fe-9Ni合金、Fe-6Al-4Ni合金和锌合金对阴极保护时的阴极电位，发现在Fe-9Ni合金保护下的阴极电位范围为−0.53~−0.57 V，既能保护铜合金又能避免Ti吸氢。同时Fe-9Ni合金阳极溶解均匀，电流效率在90%以上，工作电位稳定，是一种理想的保护钛铜共用设备的牺牲阳极材料。根据Fe-9Ni的牺牲阳极配比铸造了100块牺牲阳极，分别安装在两台海水冷却器的封头内。新的牺牲阳极使用2 a后，设备检查状况良好。

张云乾等[48]在研究田湾核电站凝汽器设备的失效问题时，发现由不锈钢和钛合金构成的凝汽器水室形成了腐蚀电偶对，加速了不锈钢的点蚀失效，在钛合金和不锈钢接触处形成了缝隙腐蚀。采用牺牲阳极对不锈钢/钛凝汽器进行保护，考虑到阴极电位既要低于不锈钢的保护电位，同时又不能太负，以防止钛合金冷凝管吸氢而发生氢脆。所采用的铁合金牺牲阳极的开路电位为−0.75 V，满足对不锈钢/钛合金阴极保护时电位的要求；同时，铁合金牺牲阳极对环境因素 (如水质、温度、电导率、含盐量、pH值等) 不敏感，并且无晶间腐蚀敏感性，在海水中处于均匀稳定的溶解状态。该铁合金牺牲阳极安装运行1 a内，对不同安装位置的阴极电位进行跟踪测量，结果显示阴极电位稳定，且长期处于设计的保护电位范围。腐蚀表面均匀，腐蚀产物易去除。阳极消耗符合设计要求，使用寿命达2~3 a。显然采用铁合金牺牲阳极对不锈钢/钛合金凝汽器进行阴极保护是理想的方案。

5 总结与展望

目前铁合金牺牲阳极已在船舶海水管路、热交换器、核电站、民用电厂等场合替代传统的Zn，Al牺牲阳极。根据被保护结构的特点，通过合理的结构设计可以很好地满足被保护体的防腐要求，同时，牺牲阳极材料需具备良好的力学性能，能够满足不同环境下的安装和使用需要。目前常用的铁基牺牲阳极形状有：棒式、长条式和管段式。

但是对于铁基牺牲阳极还缺乏系统的研究，更多的是关于其使用的相关报道，没有开发出专门的牌号和成分系列。需要对铁基牺牲阳极的性能开展更完整的研究，并对主要影响因素有更加深入的认识。另外，还需开发出针对不同被保护材料、不同pH值环境，具有不同添加元素和组织形态的铁基牺牲阳极牌号，使铁基牺牲阳极这一领域拥有更丰富的理论基础和应用实践。

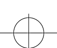
参考文献

[1] 王亚平, 康志刚, 孙权等. 埋地钢质燃气管道牺牲阳极阴极保护设计 [J]. 煤气与热力, 2008, 28(1): 13

[2] Chen X, Li X G, Du C W, et al. Effect of cathodic protection on corrosion of pipeline steel under disbonded coating [J]. Corros. Sci., 2009, 51(9): 2242

[3] De Giorgi V, Wimmer S. Geometric details and modeling accuracy requirements for shipboard impressed current cathodic protection system modeling [J]. Eng. Anal. Boundary Elem., 2005, 29(1): 15

[4] Hartt W. 2012 Frank newman speller award: Cathodic protection of



offshore structures—history and current status [J]. Corrosion, 2012, 68(12): 1063
[5] 金海峰. 阴极保护技术在石油化工设施中的设计与应用 [J]. 油气田地面工程, 2009, 28(9): 37
[6] Johnsen R, Bardal E. Cathodic properties of different stainless steels in natural seawater [J]. Corrosion, 1985, 41(5): 296
[7] Koleva D, Guo Z, Breugel K, et al. Conventional and pulse cathodic protection of reinforced concrete: electrochemical behavior of the steel reinforcement after corrosion and protection [J]. Mater. Corros., 2009, 60(5): 344
[8] 吕承杰, 王芷芳. 变电站接地网的腐蚀及牺牲阳极的应用 [J]. 全面腐蚀控制, 2006, 19(5): 33
[9] Parthiban G, Parthiban T, Ravi R, et al. Cathodic protection of steel in concrete using magnesium alloy anode [J]. Corros. Sci., 2008, 50 (12): 3329
[10] Pautasso J, Guyader H, Debout V. Low voltage cathodic protection for high strength steels: Part 1- Definition of a new aluminum galvanic anode material [A]. Corrosion /98 [C]. San Diego: NACE, 1998: 1
[11] Eliassen S. New concept for cathodic protection of offshore pipelines to reduce hydrogen induced stress cracking (HISC) in high strength 13% Cr stainless steels [J]. Corros. Eng. Sci. Technol., 2004, 39(1): 31
[12] Lemieux E, Hogan E, Lucas K, et al. Performance evaluation of low voltage anodes for cathodic protection [A]. Corrosion/02 [C]. Denver: NACE, 2002: 1
[13] 马力, 李威力, 曾红杰等. 低驱动电位Al-Ga合金牺牲阳极及其活化机制 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(4): 329
[14] 王洪仁, 邓春龙, 董飒英等. 高锰铝青铜在流动海水中阴极保护参数的研究 [J]. 海洋科学, 2005, 29(7): 55
[15] 黄桂桥. 金属在海水中的腐蚀电位研究 [J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(1): 4
[16] 黄桂桥, 金威贤, 侯文泰. 不锈钢在海水中的耐蚀性与腐蚀电位的关系 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(1): 35
[17] Groover R, Smith J, Lennox T. Electrochemical potentials of high purity metals in sea water [J]. Corrosion, 1972, 28(3): 101
[18] Lennox T, Groover R, Peterson M. How effective is cathodic protection of stainless steels in quiescent sea water [J]. Mater. Prot., 1969, 8(5): 41
[19] Schumacher M. Seawater Corrosion Handbook [M]. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1979: 235
[20] 王虹斌, 赵进刚, 韩冰. 舰船冷却设备的防腐对策 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(6): 359
[21] 王洪仁, 姚萍, 李相波等. 一种长寿命铁合金牺牲阳极 [P]. 中国, 200710015151.4. 2008
[22] 陈丽君, 丁国清, 张波等. 铁基牺牲阳极性能及其对12Cr钢管的阴极保护 [J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(9): 669
[23] 邓永生. 铁阳极在海水介质中的性能及应用 [A]. 第四届全国腐蚀大会论文集 [C]. 北京, 2003: 92
[24] 罗兆红, 龙萍, 杨世伟等. 铁基材料的牺牲阳极性能 [J]. 腐蚀与防护, 1999, 30(1): 22
[25] 陈珊, 李国民, 常万顺等. 国产铁基牺牲阳极在冷却器上的应用 [J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(5): 395
[26] 孙仁兴, 李良, 孙长坤等. 铁合金牺牲阳极材料的研究与应用 [A]. 2009'水环境腐蚀与防护学术研讨会论文集 [C]. 厦门, 2009: 140
[27] BS 7361-1-1991, Cathodic Protection-Code of Practice for Land and Marine Applications [S]. 1991
[28] Wang C B, Kong X D, Tian Z Q. Evaluation of the protection effect on copper with different sacrificial anodes [J]. Adv. Mater. Res., 2012, 602-604: 579
[29] 王顺, 孙虎元, 孙立娟. 35钢牺牲阳极性能及其对铜管阴极保护的可行性 [J]. 材料开发与应用, 2008, 23(3): 12
[30] 王顺, 孙虎元, 孙立娟. 海水-淡水中铁基牺牲阳极的性能 [J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(5): 281
[31] 黄佳典, 郭伟, 刘波等. 铁合金牺牲阳极在铜及其合金海水管路中的应用 [J]. 中国修船, 2002, (4): 37
[32] 邢少华, 李相波, 姚萍等. 铜管道内壁铁牺牲阳极保护电位数值模拟计算 [J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(10): 622
[33] 王巍, 孙虎元, 孙立娟等. 中碳钢在海水中阴极保护紫铜的二维有限元法计算研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(5): 382
[34] 王曰义. 紫铜在流动海水中的腐蚀及防护 [J]. 材料开发与应用, 1994, 9(6): 24
[35] 王光雍, 王海江, 李兴濂等. 自然环境的腐蚀与防护•大气•海水•土壤 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 145
[36] NACE Standard RP0169-96. Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems [S]. 1996
[37] 中国腐蚀与防护学会. 自然环境的腐蚀与防护 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 163
[38] 彭泽煊, 吴建华, 王春丽. 温度对工业纯钛与低合金钢电偶腐蚀行为的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(6): 463
[39] 郭敏, 彭乔. 工业纯钛在海水中阴极极化条件下的氢脆研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2001
[40] 杨长江, 梁成浩, 王华. 钛及其合金氢脆研究现状与应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(2): 122
[41] 朱志平, 于萍. 阴极保护中钙质沉积层的形成与影响 [J]. 化工腐蚀与防护, 1995, 23(1): 20
[42] 余存烨. 滨海石化厂钛铜共用海水冷却器牺牲阳极保护探讨 [J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(2): 61
[43] 铃木胜美. 复水器チタニ冷却管の水素吸收とその防止対策 [J]. 火力原子力发电, 1977, 28(1): 63
[44] 下郡一利. チタニの水素吸收 [J]. 防食技术, 1981, 30(6): 349
[45] 师红旗, 周灿旭, 丁毅等. 钛制换热器氢腐蚀破坏失效分析 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(2): 137
[46] 余存烨, 王罗贤, 龚春欢等. 钛铜共用海水冷却器的牺牲阳极保护 [J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(1): 45
[47] 余存烨. 钛铜共用的海水冷却器的牺牲阳极保护 [J]. 钛工业进展, 1999, (2): 37
[48] 张云乾, 陈凯, 徐节升等. 不锈钢/钛凝汽器中铁阳极的应用 [A]. 第五届全国腐蚀大会论文集 [C]. 北京, 2009: 1

